

ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE

Präzisionstests mit Pulsaren

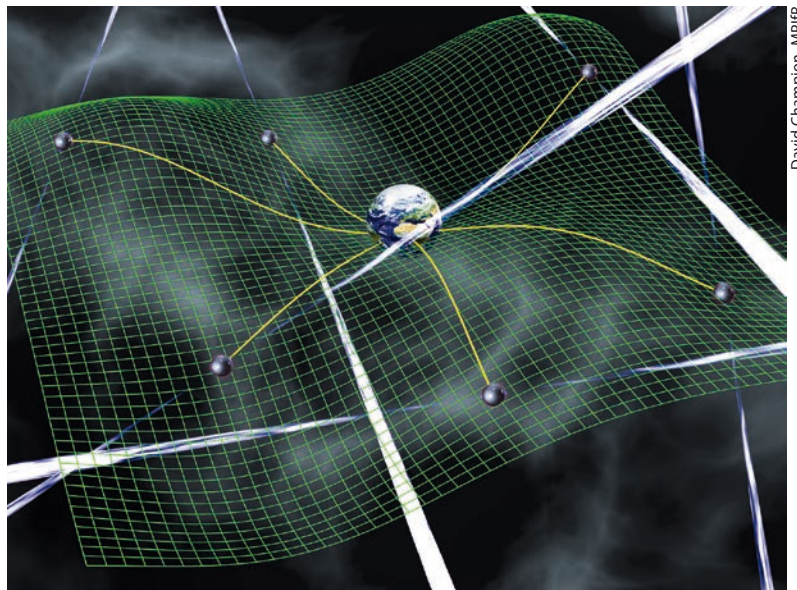
Rotierende Neutronensterne eignen sich ideal zum Testen der Allgemeinen Relativitätstheorie in starken Gravitationsfeldern.

Michael Kramer und Norbert Wex

Ähnlich zu elektromagnetischen Wellen sollten auch Gravitationswellen existieren, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Auch wenn diese Wellen bislang nicht direkt beobachtet wurden, steht ihre Existenz inzwischen außer Frage. Der indirekte Nachweis gelang mithilfe von kosmischen „Leuchttürmen“, den Pulsaren. Ihr Bahnlauf beschleunigt sich messbar, da sie aufgrund der Abstrahlung von Gravitationswellen Bahnenergie verlieren.

Am 18. November 1915 zeigte Albert Einstein, dass seine Allgemeine Relativitätstheorie (ART) auf natürliche Weise die beobachtete Periheldrehung des Merkur erklärt. Die Lösung dieses seit 1859 ungelösten Problems der Himmelsmechanik gelang Einstein bereits eine Woche, bevor er die ART als abgeschlossen erklären konnte, und markiert die erste experimentelle Überprüfung der Theorie. In demselben Beitrag schlug er des Weiteren die Lichtablenkung im Gravitationsfeld der Sonne und die Gravitationsrotverschiebung von Spektrallinien als Tests der ART vor. Der erste Nachweis der Lichtablenkung glückte ein paar Jahre später während der totalen Sonnenfinsternis am 29. Mai 1919. Die damalige Messung wies zwar noch eine recht große Unsicherheit von rund 15 Prozent auf, entschied aber zugunsten der ART, die verglichen mit der Newtonschen Theorie den doppelten Ablenkwinkel vorhersagt. Heute ist die Ablenkung an der Sonne am besten mittels der Radiostrahlung von Quasaren nachgewiesen. Die Vermessung der Quasar-Positionen mit der VLBI-Methode stimmt im Rahmen der Messgenauigkeit von etwa 10^{-4} mit der ART überein.

Die Krümmung der Raumzeit durch die Masse der Sonne lenkt aber nicht nur das Licht ferner Sterne ab, sondern verlängert auch die Laufzeit elektromagnetischer Wellen. Den besten Nachweis dieser sog. Shapiro-Laufzeitverzögerung ermöglichten 2002 die Telemetrie-Daten der Cassini-Sonde, die den Planeten Saturn umkreist. Sie erreichte eine relative Genauigkeit von etwa 10^{-5} . Als besonders schwierig stellte es sich heraus, die Gravitationsrotverschiebung in den Spektrallinien der Sonne zu beobachten, und zwar aufgrund nicht-gravitativer Einflüsse wie Plasmaströmungen in der Photosphäre. Mit hoher Präzision gelang der Nachweis der Rotverschiebung erst mit dem Mößbauer-Effekt sowie Atomuhren.



David Champion, MPIFR

Pulsare können als Endpunkte von Detektorarmen dienen, an deren gemeinsamem anderen Ende sich die Erde befindet. Ein solches Pulsar-Timing-Array sollte den Nachweis von sehr langwelligigen Gravitationswellen ermöglichen.

Inzwischen sind eine Reihe weiterer Effekte bekannt, deren Nachweis im Sonnensystem möglich ist [1]. Bisher lässt sich mit Experimenten im Sonnensystem jedoch nicht testen, ob Gravitationswellen existieren oder wie sich stark selbst-gravitierende Körper bewegen. Bereits 1916 zeigte Einstein, dass es seiner Theorie zufolge Gravitationswellen gibt, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Bei der Berechnung des mit der Abstrahlung verbundenen Energieverlusts unterlief ihm zwar zunächst ein Fehler, doch zwei Jahre

KOMPAKT

- Pulsare sind sehr kompakte Neutronensterne, die innerhalb von Millisekunden oder Sekunden um ihre Achse rotieren und wie ein Leuchtturm gebündelte Radiostrahlung emittieren.
- Bildet der Pulsar mit einem Begleiter ein Binärsystem, so lassen sich die Bahnparameter bestimmen und relativistische Effekte wie die Periastrondrehung nachweisen.
- Der wichtigste Effekt ist die Abstrahlung von Gravitationswellen und die damit verbundene Abnahme der Bahnperiode, die bei dem Doppelpulsar J0737-3039 mit einer relativen Genauigkeit von 0,03 Prozent gemessen wurde – eine eindrucksvolle Bestätigung der ART.

Prof. Dr. Michael Kramer und Dr. Norbert Wex, Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Auf dem Hügel 69, 53121 Bonn

später korrigierte er diesen in seiner Arbeit „Über Gravitationswellen“ und leitete – bis auf einen fehlenden Faktor 2 – die Quadrupolformel her. Diese setzt die abgestrahlte Gravitationswellen-Leistung in Verbindung zur dritten Zeitableitung des Massen-Quadrupols eines materiellen Systems. Einsteins Herleitung gilt jedoch nicht für Systeme, bei denen die Gravitation selbst die zeitliche Variation der Massenverteilung verursacht. Erst mehrere Jahrzehnte später gelang es, die Gültigkeit der Quadrupolformel u. a. für Doppelsterne konsistent zu zeigen. Auch wurden in dieser Zeit Näherungsverfahren für Raumzeiten entwickelt, die aus extrem kompakten Körpern mit hoher gravitativer Bindungsenergie (z. B. Neutronensterne) bestehen. Die Entdeckung der Pulsare im Jahre 1967 hatte dabei einen bedeutenden Einfluss auf diese theoretischen Untersuchungen im Rahmen der ART und alternativer Gravitationstheorien, wie der Klasse der Skalar-Tensor-Theorien.

Präzise kosmische Uhren

Pulsare sind natürliche kosmische Uhren, die sich geradezu ideal für das Testen der ART eignen. Als rotierende Neutronensterne mit einem Durchmesser von nur etwa 10 km sind sie sehr kompakt und gleichzeitig mit meist ca. 1,4 Sonnenmassen massereich (größere Werte treten ebenfalls auf). Mit beobachteten Rotationsfrequenzen bis zu 714 Hz bilden sie massive „Schwungräder“, die viel Rotationsenergie speichern und daher nur schwer aus dem Tritt zu bringen sind. Geladene Teilchen, die an den Magnetpolen beschleunigt werden, erzeugen einen kollimierten Strahl breitbandiger Radiostrahlung, die den gesamten Bereich von wenigen 10 MHz bis 100 GHz umfasst und den Neutronenstern zu einem Leuchtturm macht. Sind Neutronenstern und Erde relativ zueinander richtig

positioniert, kann ein empfindliches Radioteleskop (Abb. 1) die Strahlung als pulsierendes Signal registrieren – der Neutronenstern lässt sich also als Pulsar beobachten. Die Pulsperioden entsprechen den Rotationsperioden der Pulsare. Bisher wurden Werte von 1,4 Millisekunden bis 8,5 Sekunden beobachtet, schnellere oder langsamere Pulsare sind aber nicht ausgeschlossen. Die Taktfrequenz ist – da an die Rotation gekoppelt – so stabil, dass der Pulsar als Uhr mit irdischen Atomuhren konkurrieren kann. Die Ganggenauigkeit von einer 1 Mikrosekunde über 30 Jahre wird allerdings nicht instantan, sondern erst über mehrere Monate oder Jahre mittels des „Pulsar-Timing“ erreicht.

Tatsächlich weisen die einzelnen Pulse als Resultat kohärenter Strahlungsprozesse unterschiedliche Amplitude und Form auf, sodass ihre Ankunftszeit leicht variiert. Erst die gemittelte Pulsform aus hunderten oder tausenden Pulsen ist stabil und kann zum „Timmen“ dienen. Hierzu wird die gemittelte Ankunftszeit über einen Zeitraum von 30 bis 60 Minuten mit einer Atomuhr am Observatorium vermessen und über GPS mit einem internationalen Zeitstandard verglichen. Zudem ist es erforderlich, diese Messung regelmäßig zu wiederholen und die Ankunftszeiten in eine theoretische Ankunft im Schwerpunkt des Sonnensystems (als beste Näherung eines Inertialsystems) zu transformieren.

Nach ein paar Monaten oder Jahren sind die Rotations-eigenschaften des Pulsars, dessen Abbremsrate durch die Umwandlung von Rotationsenergie in elektromagnetische Strahlung bestimmt ist, und auch seine Position am Himmel so genau bekannt, dass sich die genaue Anzahl der Rotationen zwischen zwei Messpunkten ermitteln lässt. Damit hat man eine in der Rotationsphase kohärente „Timing-Lösung“, die mit jeder gemessenen Rotation – und somit im Laufe der Zeit – immer genauer wird. Daher eignen sich Pulsare als Präzisionsmessgeräte. Mit ihrer Hilfe war es möglich, die Massen der Neutronensterne mit einer relativen Genauigkeit bis etwa 0,01 Prozent zu messen, die relativistische Periastrondrehung (siehe unten) bis zu einer Genauigkeit von 1 : 1 000 000 und die Rotationsperiode der besten Pulsare mit einer Genauigkeit von einer Attosekunde!

Wenn der Pulsar einen Begleiter hat, beeinflusst auch die Bahnbewegung des Pulsars die gemessene Ankunftszeit, sodass sich die Bahnparameter mit entsprechender Präzision messen lassen. Diese Genauigkeit reicht aus, um Abweichungen von der klassischen Bahn zu entdecken und relativistische Effekte sichtbar zu machen. Insbesondere wenn der Orbit eng ist und der Begleiter ein kompaktes Objekt, z. B. ein zweiter Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch, stellt dieser Doppelstern-Pulsar potenziell ein hervorragendes Labor zum Testen der ART dar.



Abb. 1 Mit dem 100-Meter-Radioteleskop des Max-Planck-Instituts für Radioastronomie in der Nähe von Effelsberg

wird beispielsweise die breitbandige Radiostrahlung von Pulsaren nachgewiesen.

Ein Labor mit Dreh

Seit der Entdeckung der ersten Pulsare wird der Himmel wiederholt systematisch nach neuen Quellen abgesucht – mit verbesserter Empfindlichkeit und schnelleren Abtastraten. Allein in den ersten sieben Jahren nach der Entdeckung der Pulsare wurden etwa hundert weitere im Radiobereich entdeckt. Alle diese Pulsare waren Einzelsterne, die trotz ihrer starken internen Gravitationsfelder keine Möglichkeit boten, die ART zu testen. Den ersten Pulsar mit einem gravitativ gebundenen Begleiter entdeckten die US-Astronomen Russell A. Hulse und Joseph H. Taylor 1974 im Rahmen einer systematischen Suche mit Hilfe des 305-Meter-Arecibo-Radioteleskops auf der Insel Puerto Rico [2]. Dieser Doppelstern-Pulsar mit der Bezeichnung PSR B1913+16 (benannt nach seinen Himmelskoordinaten) hat eine Rotationsperiode von 59 Millisekunden und bewegt sich in 7,8 Stunden auf einer exzentrischen Bahn um seinen (unsichtbaren) Begleitstern, bei dem es sich mit großer Wahrscheinlichkeit ebenfalls um einen Neutronenstern handelt.

Aufgrund der Bahnparameter war bereits kurz nach der Entdeckung klar, dass Hulse und Taylor auf ein einzigartiges Testsystem für die ART gestoßen waren. Nur wenige Monate später zeigte sich der erste relativistische Effekt in den Daten: Analog zur Periheldrehung des Merkur drehen sich die Bahnellipsen von Pulsar und Begleiter im Raum, was in einem Doppelsternsystem als Periastrondrehung bezeichnet wird. PSR B1913+16 zeigt eine Periastrondrehung von 4,2 Grad pro Jahr; das ist ein Faktor 35 000 höher als bei Merkur mit 0,43 Bogensekunden pro Jahr. Für einen quantitativen Test der ART benötigt man für die Berechnung der Präzessionsrate neben den beobachteten Keplerschen Parametern allerdings auch die Gesamtmasse des Doppelsternsystems, die zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt war. Auch nach der Entdeckung der Zeitdilatation, bedingt durch die periodisch sich ändernde Bahngeschwindigkeit des Pulsars und die vom Begleiter verursachte Gravitationsrotverschiebung, war ein quantitativer Test der ART noch nicht möglich, da die Zeitdilatation u. a. von den beiden Massen von Pulsar und Begleiter abhängt.

Allerdings ist an dieser Stelle das Doppelsternsystem vollständig bestimmt, wenn man von einer bestimmten Gravitationstheorie wie der ART ausgeht. Jeder weitere Effekt muss sich nun mit den daraus resultierenden Massen erklären lassen, sonst ist die Gravitationstheorie falsifiziert. Im Fall des Hulse-Taylor-Pulsars war dies die Abstrahlung von Gravitationswellen und die damit verbundene Rückwirkung auf die Orbitalbewegung des Systems. Die Wellenabstrahlung bewirkt einerseits ein Schrumpfen der Pulsarbahn, was bisher noch nicht direkt zu beobachten war, andererseits verkürzt sich dadurch die Orbitalperiode des Systems kontinuierlich. Letzteres führt zu einer Beschleunigung in der Orbitalphase des Pulsars und lässt sich mithilfe von Pulsar-Timing mit großer Genauigkeit vermessen. Die beobachtete Entwicklung der Orbital-

phase bei PSR B1913+16 entspricht perfekt den Voraussetzungen der Quadrupolformel der ART [3]. PSR B1913+16 war damit der erste Beleg für die Existenz von Gravitationswellen. Hulse und Taylor erhielten 1993 für die Entdeckung dieses damals einmaligen Testsystems für die ART den Physik-Nobelpreis.

Inzwischen ist der Hulse-Taylor-Pulsar an seine Grenzen gestoßen. Die damit erreichte relative Genauigkeit von 0,3 Prozent für die Gravitationswellenabstrahlung ist in absehbarer Zeit wohl nicht zu verbessern. Das liegt an der großen Unsicherheit der Entfernungsmessung von PSR B1913+16 und der daraus resultierenden Unsicherheit in der Korrektur für die differentielle gravitative Beschleunigung. Die unterschiedliche Beschleunigung im Gravitationsfeld der Milchstraße ändert die Relativgeschwindigkeit zwischen Pulsar und Sonnensystem und liefert somit einen Beitrag zur beobachteten Änderung der Bahnperiode (zeitabhängiger Doppler-Effekt). Dies gilt es zu korrigieren, um die durch die Gravitationswellenabstrahlung verursachte (intrinsische) Bahnperiodenänderung zu ermitteln.

Pulsare im Doppelpack

2003 wurde ein neues System entdeckt, dessen differentielle gravitative Beschleunigung zum Sonnensystem viel kleiner (und bisher vernachlässigbar) ist und dessen Bahnparameter viel kompakter sind als beim Hulse-Taylor-Pulsar. Bei PSR J0737-3039 kreisen zwei Neutronensterne mit einer Orbitalperiode von nur 147 Minuten und einem Abstand von drei Lichtsekunden auf leicht-exzentrischen Bahnen um den gemeinsamen Schwerpunkt (Abb. 2). Zudem sind beide Neutronensterne aktive Radiopulsare! Pulsar J0737-3039A (kurz „A“) hat eine Rotationsperiode von nur 23 Millisekunden, während PSR J0737-3039B („B“) eine lange Periode von 2,8 Sekunden aufweist. Dieser

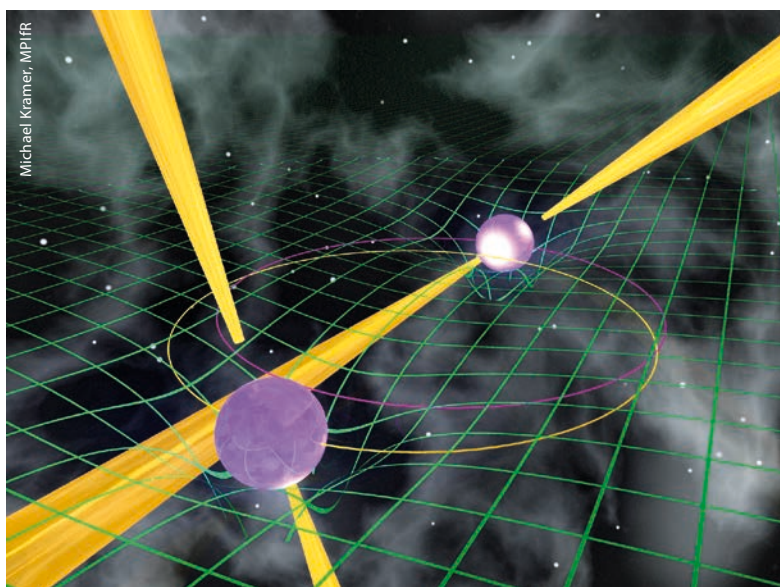


Abb. 2 Die beiden Pulsare von PSR J0737-3039 verursachen eine starke Raumkrümmung. Sie weisen unterschiedliche Perioden und Strahlungsrichtungen auf.

erste „Doppelpulsar“ ermöglicht es, direkt mehrere relativistische Effekte zu testen.

Innerhalb weniger Tage nach der Entdeckung gelang es, die Periastrondrehung zu messen: Diese ist mit fast 17 Grad pro Jahr viermal größer als bei PSR B1913+16. Während sich daraus die Gesamtmasse unter Annahme der ART ergibt, steht noch eine weitere Information über die Massen zur Verfügung. Da beide Neutronensterne als Pulsare sichtbar sind (oder genauer waren, siehe unten), kann man beide Orbits um den gemeinsamen Schwerpunkt vermessen. Die relative Größe der Bahnhalbachsen entspricht genau dem umgekehrten Verhältnis der Massen. Aus der Kombination von Summe und Verhältnis ergeben sich die Massen der beiden Pulsare zu 1,34 und 1,25 Sonnenmassen. Dies erlaubt es, die Größe weiterer relativistischer Effekte vorherzusagen und mit den Messungen zu vergleichen.

Für Tests der ART ist der Doppelpulsar ein einzigartiges System. Wie beim Hulse-Taylor-Pulsar war es möglich, die Zeitdilatation zu messen, die eine Amplitude (maximale Abweichung der Pulsar-Uhr) von 386 Mikrosekunden aufweist. Auch sehen wir eine direkte Auswirkung der Raumkrümmung auf die am Teleskop gemessenen Ankunftszeiten. Der Orbit ist so orientiert, dass wir ihn von der Erde aus zufällig fast genau „von der Kante“ sehen. Damit müssen die Signale eines jeden Pulsars während der oberen Konjunktion in einer Entfernung von nur ca. 20 000 Kilometer am Begleiter vorbei. Bei der Ausbreitung in der stark gekrümmten Raumzeit in der Nähe des Begleiters verlängert sich die Flugzeit der Photonen, was sich auf der Erde als Shapiro-Laufzeitverzögerung bemerkbar macht. Die Amplitude und der Verlauf der Verzögerung als Funktion der Orbitalphase erlauben zwei weitere Tests der ART, die wiederum mit Bravour bestanden wurden.

Die Tatsache, dass wir die Orbitalebene fast von der Kante aus sehen, hat eine weitere interessante Auswirkung: Für rund 30 Sekunden verdeckt die plasmagefüllte Magnetosphäre von B (die aufgrund der langsameren Rotationsfrequenz viel größer ist als die von A) das Signal von A. Doch diese Verfinsternung ist nicht komplett. Die torusförmige Magnetosphäre ist auf der Drehachse von B zentriert und mit dieser gegenüber der Bahnebene und zum Beobachter geneigt. Sie ist in ihrer vertikalen Ausdehnung gerade so dick, dass Licht von A uns auch während bestimmter Orbitalphasen (Konjunktion) gerade noch erreichen kann. Damit besitzt die Verfinsternung ein von der Rotation von B moduliertes Muster, das empfindlich von der Orientierung der Spinachse von B abhängt. Diese ändert sich aber im Laufe der Zeit durch die geodätische Präzession. Als Kreisel, der sich in einer gekrümmten Raumzeit um den gemeinsamen Schwerpunkt bewegt, variiert die Ausrichtung des Kreisels relativ zu einem entfernten Beobachter. Wir können diesen Effekt im Muster verfolgen und damit die Präzessionsrate bestimmen. Trotz einer gesamten Präzessionsperiode von über 70 Jahren gelang dies bereits 2008: Demnach ver-

hält sich dieser Effekt, den der Satellit Gravity Probe-B im schwachen Gravitationsfeld der Erde nachgewiesen hat, auch bei stark selbst-gravitierenden Massen wie von der ART vorhergesagt [4].

Mit der geodätischen Präzession ändert sich die Richtung des Radiostrahls von B zur Erde. Daher zeigt dieser seit ein paar Jahren nicht mehr zur Erde, sollte aber spätestens nach einer vollen Präzessionsperiode wieder sichtbar sein. Da die Spinachse von A glücklicherweise nahezu perfekt parallel zum Bahndrehimpuls angeordnet ist, bleibt A auf lange Zeit sichtbar und steht uns damit für Tests der ART zur Verfügung – seine Lebensdauer beträgt wahrscheinlich mehrere Milliarden Jahre. Der vielleicht wichtigste Effekt ist die Gravitationswellenabstrahlung und die damit verbundene stetige Abnahme der Bahnperiode, die wir derzeit mit einer relativen Genauigkeit von etwa 0,03 Prozent messen können. Der gemessene Wert stimmt perfekt mit der Vorhersage der ART überein, sodass der Doppelpulsar derzeit der beste Beweis dafür ist, dass Gravitationswellen existieren. Die direkte Detektion von Gravitationswellen mittels Detektoren auf der Erde, wie Advanced LIGO, GEO600 oder Virgo, ist daher nur eine Frage der Zeit.

Kein Hinweis auf alternative Theorien

Auch wenn die ART bisher alle Tests bestanden hat (Abb. 3), muss man, wie einleitend erklärt, Alternativen in Betracht ziehen und diese ähnlichen Tests unterziehen. Als Beispiel sei eine Klasse von Theorien erwähnt, welche die bei der Rotation von Galaxien gemessenen Phänomene nicht durch unsichtbare, nur gravitativ wechselwirkende Elementarteilchen („Dunkle Materie“) erklären, sondern durch Korrekturen zur ART auf galaktischen Skalen. Eine bisher recht erfolgreiche Klasse von derartigen Alternativtheorien ist unter dem Namen „TeVeS“ bekannt. Es handelt sich hierbei um eine relativistische Formulierung der bekannten „Modified Newtonian Dynamics“ (MOND), welche die Gravitation durch ein Tensor-, ein Vektor- und ein Skalarfeld beschreibt. Allerdings sagt TeVeS nicht nur Effekte auf großen Skalen vorher, sondern auch bei der Bahnbewegung bestimmter Binärsysteme. So führt z. B. das Skalarfeld zu einem zusätzlichen Energieverlust bei der Emission von Gravitationswellen. Die Genauigkeit unserer Messungen beim Doppelpulsar erlaubt es, nach diesen Effekten zu suchen – wir sehen sie aber nicht. Um beim Doppelpulsar (und im Sonnensystem) unsichtbar zu sein, aber gleichzeitig in Galaxien zu wirken, müsste die Theorie unnatürlich fein justiert sein – was höchst unwahrscheinlich ist. Weitere Messungen werden uns wohl bald erlauben, auch diese Feinjustierung auszuschließen.

Neben den Doppelsternsystemen eignen sich auch andere Pulsar-Systeme als „Laboratorien“ für die ART, allen voran Pulsare mit einem Weißen Zwerg als Begleiter. Das bisher interessanteste Testsystem dieser Art wurde 2007 im Zuge des Drift-Scan-Surveys mit

dem 100-Meter-Radioteleskop in Green Bank, USA, entdeckt. Der Pulsar PSR J0348+0432 hat eine Pulsperiode von 39 Millisekunden und bewegt sich auf einer praktisch kreisförmigen Bahn in nur 2,5 Stunden um den gemeinsamen Schwerpunkt mit seinem Begleiter. Der Begleiter ist ein Weißer Zwerg, der bei optischen Wellenlängen als relativ heller Stern von etwa 21. Größenklasse erscheint. Im Spektrum des Sterns sieht man sehr deutlich die Balmer-Linien der Wasserstoffatmosphäre. Über die Doppler-Verschiebung der Spektrallinien lässt sich die Bahnbewegung des Weißen Zwergs ausmessen, woraus unmittelbar das Massenverhältnis von Pulsar und Begleiter folgt. Aus der genauen Form der Spektrallinien ergeben sich Temperatur und Gravitationsbeschleunigung an der Oberfläche des Weißen Zwergs. Ein Vergleich mit Modellen für Weiße Zwerge erlaubt es somit, seine Masse zu bestimmen. Ende Dezember 2011 führte unser Doktorand John Antoniadis die entsprechenden Beobachtungen beim Begleiter von PSR J0348+0432 mit einem der vier 8,2-Meter Hauptteleskope des VLT (Very Large Telescope) der ESO in Chile durch. Die daraus resultierende Masse von $2,01 \pm 0,04$ Sonnenmassen für den Pulsar ist die bis dato größte gemessene Masse eines Neutronensterns [5]. Zusammen mit einem ähnlich massereichen Neutronenstern, den Kollegen aus den USA 2010 gefunden haben [6], hat dies entscheidende Implikationen für unser Verständnis von Materie bei Dichten jenseits der Kerndichte.

Mit der Kenntnis der Massen von Pulsar und Begleiter (0,172 Sonnenmassen) ist es möglich, den Verlust an Energie durch die Abstrahlung von Gravitationswellen zu berechnen. Demnach sollte die Bahnperiode um 8,2 Mikrosekunden pro Jahr abnehmen, was sich mittels der hochpräzisen Vermessung der Ankunftszeiten der Pulsarsignale feststellen lassen sollte. Die Auswertung der Daten zeigte, dass die Umlaufperiode stetig abnimmt und ihr Wert im Rahmen der Messgenauigkeit von vier Prozent bestens mit der Vorhersage der ART übereinstimmt. Verglichen mit dem Doppelpulsar ist die Genauigkeit um den Faktor 100 schlechter. Der hohe Unterschied in der (spezifischen) gravitativen Bindungsenergie zwischen Pulsar ($\epsilon \sim 0,15$) und Begleiter ($\epsilon \sim 10^{-5}$) macht dieses System jedoch besonders empfindlich für gravitative Dipolstrahlung, eine Vorhersage vieler alternativer Gravitationstheorien.¹⁾ Aus diesem Grund ist PSR J0348+0432 das derzeit beste Testsystem für eine große Klasse an Skalar-Tensor-Theorien.

Hinzu kommt ein weiterer wichtiger Aspekt: Bei den starken Gravitationsfeldern eines Neutronensterns verhält sich die Natur sehr nichtlinear, und kleine Änderungen in der gravitativen Bindungsenergie könnten zu starken Abweichungen von der ART führen. Derartige Abweichungen beeinflussen die Erzeugung von Gravitationswellen und damit die Rate, mit welcher der Orbit des Systems aufgrund des Energieverlusts schrumpft. Die gute Übereinstimmung der beobachteten Veränderung in der Bahnperiode mit der Vorhersage der ART bei PSR J0348+0432 bestätigt somit

1) In der ART ist das niedrigste Strahlungs-Multipolmoment das Quadrupolmoment. In alternativen Theorien, bei denen zusätzliche Felder an der gravitativen Wechselwirkung beteiligt sind, kann es durch die zusätzlichen „gravitativen Ladungen“ (analog zu elektrisch geladenen Massen) zu Dipolstrahlung und je nach Feldeigenschaft (z. B. bei Skalarfeldern) auch zu Monopolstrahlung kommen. Letztere spielt bei Doppelsternsystemen in der Regel eine untergeordnete Rolle.

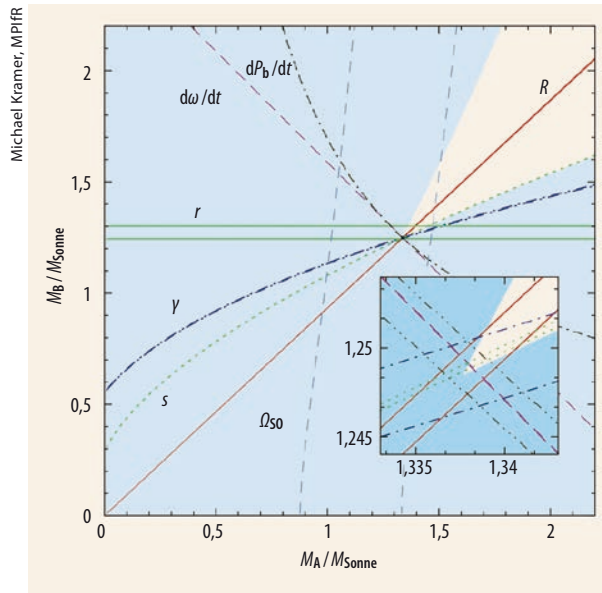


Abb. 3 Der Doppelpulsar erlaubt verschiedene Tests der ART. Jeder gemessene relativistische Effekt schränkt die beiden a priori unbekanntenen Massen des Doppelsternsystems M_A bzw. M_B ein. Die jeweils zwei Linien (z. T. nicht aufgelöst) entsprechen einem 1- σ -Bereich: Periastrondrehung ($d\omega/dt$), Shapiro-Laufzeitverzögerung (r , s), Zeitdilatation (γ), Gravitationswellenabstrahlung (dP_b/dt), geodätische Präzession (Ω_{50}). Das Massenverhältnis $R = M_A/M_B$ ergibt sich aus der Bahnbewegung beider Pulsare. Eine Gravitationstheorie hat den Test bestanden, wenn es für alle gemessenen Effekte eine gemeinsame Schnittmenge in der Masse-Masse-Ebene gibt, was hier für die ART der Fall ist. Der blau markierte Bereich ist aufgrund der Tatsache ausgeschlossen, dass der Neigungswinkel der Bahnebene maximal 90 Grad (Kantensicht) betragen kann.

nicht nur auf qualitativ neue Weise Einsteins Gravitationstheorie, sondern schränkt zudem viele alternative Theorien ein.

Die direkte Suche nach Gravitationswellen

Die geschilderten Experimente beweisen nicht nur die Existenz von Gravitationswellen, wir können sie wohl bald auch mit Hilfe von Pulsaren direkt detektieren. Die Idee dazu ist ähnlich wie bei den LIGO-Detektoren, bei denen die Gravitationswellen die relative Armlänge des kilometerlangen Michelson-Interferometers messbar ändern. Durch das Timen von genauen Pulsaren in verschiedenen Richtungen können wir einen Detektor aufbauen, der tausende Lichtjahre groß ist. Die Pulsare wirken als Endpunkte der Detektorarme, an deren gemeinsamem anderen Ende sich die Erde befindet. Die Bewegung von Gravitationswellen über die Erde hinweg verändert die lokale Raumzeit so, dass sich die Ankunftszeiten der Pulse am Teleskop systematisch verändern. Diese Veränderungen korrelieren für die verschiedenen Pulsare mit der Position am Himmel. Pulsare, die von der Erde aus in die gleiche oder entgegengesetzte Richtung am Himmel stehen, sind in ihren Ankunftszeiten positiv korreliert (d. h. alle diese Pulsare gehen scheinbar synchron zu schnell oder zu langsam), während Pulsare mit einem

rechten Winkelabstand am Himmel antikorreliert sind. Dies ist ein direktes Resultat der zu erwartenden Quadrupolnatur der Gravitationswellen. (Tatsächlich lassen sich aus möglichen Abweichungen von dieser charakteristischen Korrelation bei ausreichender Genauigkeit Schlüsse auf die Polarisierungseigenschaften von Gravitationswellen oder die Masse von Gravitonen ziehen.) Diese Methode, bekannt als Pulsar Timing Array (PTA), ist empfindlich auf Gravitationswellen mit Nanohertz-Frequenzen, also deutlich unter den Frequenzen bei LIGO (kHz) und eLISA/NGO (mHz – μ Hz). Dieser Frequenzbereich ergibt sich zum einen durch die Beobachtungslänge (Jahrzehnte) und zum anderen durch die Notwendigkeit, die irdische Bahnbewegung bei der Auswertung der Pulsardaten zu berücksichtigen (Jahr). Eine Art von Quellen passt in Frequenz und Amplitude genau zur PTA-Methode: der binäre „Tanz“ supermassiver Schwarzer Löcher in der Frühphase des Universums, als sich größere Galaxien durch das Verschmelzen kleinerer Galaxien gebildet haben. Dieser häufige Prozess erzeugte einen stochastischen Hintergrund von Gravitationswellen, der nach unserem besten Verständnis der Galaxienentwicklung nahe unserer momentanen PTA-Genauigkeit liegt. Diese entspricht bei den drei wichtigsten PTA-Experimenten, dem Europäischen Pulsar Timing Array (EPTA), dem australischen Parkes Pulsar Timing Array (PPTA) und dem nordamerikanischen NANOGrav, einer charakteristischen Amplitude von ca. 10^{-15} für ein Signal mit der Frequenz 1/Jahr. Vermutlich brauchen wir zur Detektion eine Verbesserung um einen Faktor 3, die durch verbesserte Messungen und größere Teleskope möglich sein sollte. Beobachtungen, bei denen das Effelsberger 100-m-Teleskop das entscheidene Rückgrat bildet, sind im vollen Gange.

Ein Blick in die Zukunft

Wir können erwarten, dass die PTA-Experimente in nicht allzu ferner Zukunft eine ausreichende Empfindlichkeit erreichen, um niedrigfrequente Gravitationswellen zu entdecken. Der genaue Zeitpunkt hängt unter anderem von instrumentellen Fortschritten ab sowie von unserer Fähigkeit, die Effekte des interstellaren Mediums zu berücksichtigen. Spätestens in zehn Jahren sollten wir nicht nur nHz-Gravitationswellen detektiert haben, sondern mit PTAs auch die Quellen untersuchen und Tests von Gravitationstheorien durchführen können. Gemeinsam mit Advanced LIGO & Co. öffnet sich damit ein neues Fenster zur Erforschung des Universums, zudem wird die ART auch bisher unmöglichen Tests unterworfen.

Die nächsten 100 Jahre der ART werden auch dank anderer Entwicklungen zu einem spannenden Zeitalter. So wird das im Design befindliche Square-Kilometre-Array (SKA) zehnmal mehr Pulsare und relativistische Systeme entdecken können. Die 100-fache Genauigkeit des SKA (verglichen z. B. mit Effelsberg) wird Timing-Messungen erlauben, die über

unsere jetzigen Möglichkeiten weit hinausgehen. Wir werden endlich einen Pulsar mit einem Schwarzen Loch als Begleiter finden. Und selbst wenn diese Systeme rar sind, können wir zumindest Pulsare im Orbit um Sgr A* erwarten, dem supermassiven Schwarzen Loch im Zentrum der Milchstraße. Damit wären qualitativ neue Tests der ART mit einer Präzision möglich, die andere Beobachtungen des galaktischen Zentrums in naher Zukunft wohl kaum erlauben [7]. Gemäß Chandrasekhar sind die Schwarzen Löcher der ART „the most perfect and simplest macroscopic objects“. Dies zu testen ist eines der großen Vorhaben der experimentellen Gravitation.

Literatur

- [1] C. M. Will, Living Reviews in Relativity **17**, 4 (2014), <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2014-4>
- [2] R. A. Hulse und J. H. Taylor, Astrophys. Journal **195**, L51 (1975)
- [3] J. Weisberg et al., Astrophys. Journal **722**, 1030 (2010)
- [4] R. P. Breton et al., Science **321**, 104 (2008)
- [5] J. Antoniadis et al., Science **340**, 448 (2013)
- [6] P. B. Demorest et al., Nature **467**, 1081 (2010)
- [7] K. Liu et al., Astrophys. Journal **747**, 1 (2012)

DIE AUTOREN

Michael Kramer (FV Gravitation und Relativitätstheorie, Extraterrestrische Physik) ist Direktor am Max-Planck-Institut für Radioastronomie (MPIfR) in Bonn und Professor für Astrophysik an der University of Manchester sowie Honorarprofessor an der U Bonn. Er gehörte dem Team an, das 2003 den Doppelpulsar entdeckte.



Norbert Wex (FV Gravitation und Relativitätstheorie) ist theoretischer Astrophysiker und leitet am MPIfR die Theoriegruppe in der Abteilung Radioastronomische Fundamentalphysik. Er befasst sich insbesondere mit relativistischen Theorien der Gravitation und deren Überprüfung mittels Pulsar-Timing.

